

小型低温余热发电系统膨胀机输出特性试验研究

刘广彬, 赵远扬, 李连生, 卜高选, 束鹏程

(西安交通大学流体机械及压缩机国家工程研究中心, 710049, 西安)

摘要: 依据有机朗肯循环原理, 采用 R123 作为循环工质、涡旋膨胀机作为能量回收机械, 建立了小型低温余热发电试验系统, 分析了相同热源入口温度和流量、不同工质流量的两种工况下膨胀机转速对系统性能的影响。结果表明: 涡旋膨胀机的吸气压力和吸气温度随转速的增加而降低, 排气压力和排气温度随转速的增加而增加; 系统发电功率和系统热电效率随着转速的增加而降低; 涡旋膨胀机的容积效率随着转速的增加而增加。两种工况下系统最大发电功率分别为 0.66 kW 和 0.62 kW, 最大系统热电效率均为 2.1%, 容积效率变化范围分别为 38.5%~56.5% 和 39.7%~60.0%。

关键词: 低温余热; 有机朗肯循环; 涡旋膨胀机

中图分类号: TM61 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)11-0100-04

Experiment on Output Characteristics of Scroll Expander in Small Power Generation System with Low-temperature Waste Heat

LIU Guangbin, ZHAO Yuanyang, LI Liansheng, BU Gaoxuan, SHU Pengcheng

(National Engineering Research Center of Fluid Machinery and Compressors, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A small power generator test system with low-temperature waste heat was built using R123 as working fluid and a scroll expander as a power recovery machine on the basis of the theory of organic Rankine cycle. The influence of the rotating speed of the scroll expander on the system performance was analyzed at the same inlet temperature and mass flow rate of heat source, and the two different mass flow rates of working fluid. The results show that the suction pressure and the suction temperature of the scroll expander decreased but the discharge pressure and the discharge temperature increased with the increase in the rotating speed. The power generated and the total efficiency decreased while the volumetric efficiency of the scroll expander increased with the increase in the rotating speed. Under the two test conditions, the maximum power generated was 0.66 kW and 0.62 kW, respectively; both the maximum total efficiencies were 2.1%; the range of volumetric efficiency was 38.5%-56.5% and 39.7%-60.0%, respectively.

Keywords: low-temperature waste heat; organic Rankine cycle; scroll expander

低温余热具有量大、温度低、分布范围广等特点, 回收这部分能量不仅可以提高整体的能源利用率, 缓解能源危机, 还可以降低由于低温余热引起的环境污染, 达到节能减排的目的。有机朗肯循环系统 (ORC) 具有效率高、适用性强、小型方便等特点, 在回收低温余热方面具有较大的优势。近年来, 对于

ORC 系统的研究主要集中在理论研究方面: Maizza^[1] 比较了不同种类有机工质的效率, 得出 R123 具有较好的性能; Saleh 等人^[2] 分析了不同工质特性 (干性、湿性、等熵工质) 和有、无回热器时不同工质效率变化关系; 魏东红等人^[3-4] 以 R245fa 为工质, 分析了烟气流量和温度、过冷度、环境温度等

对系统性能的影响;Manolakos 等人^[5]将 ORC 装置应用于海水淡化系统,提高了系统性能. 还有针对 ORC 系统在回收地热能、太阳能等方面应用的研究,研究的热点主要集中在循环工质的选择、系统热力学分析、系统可行性等方面,通过试验方法研究系统性能的文献较少.

本文建立了小型低温余热发电试验系统,采用 R123 作为循环工质、涡旋膨胀机作为能量回收机械,分析了膨胀机转速对系统发电功率、系统热电效率、膨胀机容积效率等性能参数的影响.

1 理论分析

ORC 系统利用低温余热加热循环工质,产生的高温高压蒸气推动膨胀机对外做功,从而达到余热的动力利用. 系统发电功率、系统热电效率和膨胀机容积效率是评价系统性能的重要参数,定义如下.

(1) 发电功率^[6]

系统发电功率是指系统通过回收低温余热而产生的电能,它不仅与工质循环量、循环工况有关,同时受膨胀机效率和发电机效率影响. 系统发电功率由下式表示

$$W_t = q_{mr}(h_1 - h_2)\eta_e\eta_g \quad (1)$$

式中: W_t 为系统发电功率; q_{mr} 为工质质量流量; h_1 、 h_2 分别为膨胀机入口和出口工质比焓; η_e 为膨胀机效率; η_g 为发电机效率.

(2) 热电效率

系统热电效率为系统输出净电功率与系统从热源吸收的热量的比值,它表示了将低温热源能量转化成电能的效率,按下式计算

$$\eta_{he} = \frac{W_t - W_p}{q_{ms}(h_{si} - h_{so})} \quad (2)$$

式中: η_{he} 表示系统热电效率; W_p 表示系统工质循环泵耗功; q_{ms} 表示热源质量流量; h_{si} 和 h_{so} 分别表示热源入口和出口比焓.

(3) 容积效率

容积效率表示膨胀机理想过程的质量流量与实际过程质量流量的比值,它表征了膨胀机泄漏损失的大小,用下式表示

$$\eta_v = \frac{q_{mi}}{q_{ma}} \quad (3)$$

式中: η_v 表示膨胀机容积效率; q_{mi} 表示理想过程质量流量; q_{ma} 表示实际过程质量流量.

2 试验系统

2.1 涡旋膨胀机

本文所研究的小型低温余热发电系统采用涡旋膨胀机作为能量回收机械,其结构如图 1 所示. 几何参数相同的两台涡旋膨胀机对称地安装在发电机两侧. 高压气体经过吸气孔口分别进入两侧膨胀机并膨胀做功,膨胀终了的低压气体经排气孔口流出并在壳体内汇集,最终流出膨胀机. 涡旋膨胀机的动盘与发电机主轴相连,而静盘与壳体相连,避免了由于动密封引起的工质泄漏.

涡旋膨胀机的主要结构参数如下:基圆半径为 3.66 mm,渐开线发生角为 36° ,基圆中心距为 6.9 mm,涡旋体高度为 40 mm,涡旋线为 3 圈.

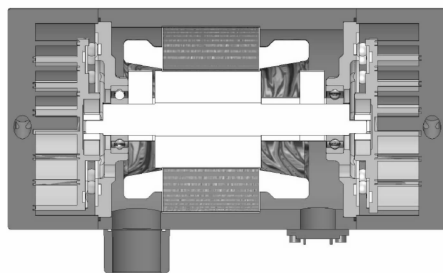


图 1 涡旋膨胀机结构示意图

2.2 试验系统

如图 2 所示,采用热水模拟废热源,通过温控系统控制电加热的热量,以保持热源出口温度恒定. 工质循环泵采用变频调节,用以控制工质的循环量. 发电机输出的电能经电气测量系统与负载连接,负载电阻可以调节以控制发电机的转速. 电气测量系统可以测量电压、电流、功率、电频率等参数.

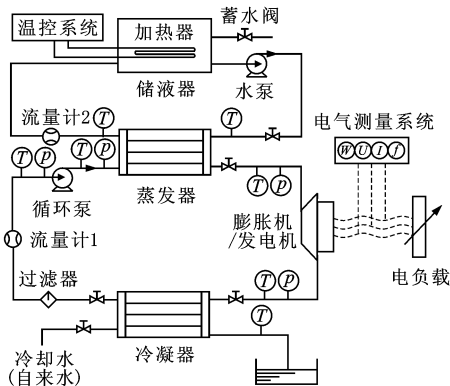


图 2 试验系统流程图

3 试验结果与讨论

试验采用相同的热源入口温度 t_s 和相同的热

源流量 q_{ms} , 不同工质质量流量 q_{mr} 的 2 种工况下进行了测量, 通过调节负载电阻值获得不同转速 n , 热源和冷却水泵功率分别为 W_{sp} 和 W_{cp} , 具体参数如表 1 所示.

由于热源入口温度和流量恒定, 循环工质的质量流量恒定, 所以当膨胀机转速发生变化时, 膨胀机进、出口的温度、压力将发生变化. 表 2 和表 3 分别为两种工况膨胀机不同转速下的进出口参数值. 从表中可以看出, 在两种工况下, 随着转速的增加, 膨胀机吸气压力、温度均下降, 排气压力、温度均升高, 并且吸气参数变化较大. 涡旋膨胀机转速增加使得膨胀机吸气体积流量增加, 在工质质量流量不变的条件下, 入口工质密度必将下降, 表中测试的吸气参数变化满足这一规律.

图 3 为系统发电功率 W_t 随转速的变化趋势. 在测定转速范围内, 低转速时, 系统发电功率随转速变化较小, 随着转速的增加, 发电功率下降明显. 发电功率受多方面因素影响, 转速的增加会引起膨胀机吸气压力和吸气温度的降低, 进而引起系统理论输出功率降低, 同时膨胀机的摩擦损失增大. 从图 3 可以看出: 在工况 1 时, 系统发电功率从 0.66 kW 降低至 0.40 kW, 最大值为 0.66 kW; 在工况 2 时, 系统发电功率从 0.62 kW 降低至 0.38 kW, 最大值

为 0.62 kW. 当转速低于 1 400 r/min 时, 2 种工况的发电功率变化均较小.

图 4 为系统热电效率 η_{he} 随转速的变化规律. 系统热电效率是评价低温余热发电系统性能的重要参数, 热电效率高则低温余热的利用率高. 从图 4 可以看出, 系统的热电效率随着膨胀机转速的增加而降低, 在低转速时变化较小, 在高转速时变化明显. 这主要是因为热源供热量变化较小, 而转速的增加导致工况发生变化, 实际发电功率大大降低, 并导致系统热电效率降低. 在两种工况下, 系统最大理论效率分别为 8.0% 和 6.8%, 而实际测量系统热电效率均从 2.1% 降低至 1.2%, 最大值均为 2.1%. 涡旋膨胀机泄露较严重和发电机的效率较低是导致系统热电效率较低的主要原因.

容积效率是评价涡旋膨胀机泄漏损失的重要参数, 容积效率高, 则工质的泄漏量少, 反之则泄漏量大. 图 5 是涡旋膨胀机容积效率 η_v 随转速的变化规律. 容积效率随着转速的增加而增加, 这是因为转速的增加导致工质在膨胀腔内的泄漏时间减少的缘故. 容积效率不仅与动、静涡盘的间隙有关, 还受膨胀机吸、排气参数影响. 随着转速的增加, 在工况 1 时, 膨胀机容积效率从 38.5% 增加至 56.5%, 在工况 2 时, 容积效率从 39.7% 增加至 60.0%.

表 1 试验工况参数

工况	$t_s/^\circ\text{C}$	$q_{ms}/\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	$q_{mr}/\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	$n/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	W_{sp}/kW	W_{cp}/kW
1	84.6	0.394	0.176	1 250~1 570	0.021	0.014
2	84.6	0.394	0.162	1 206~1 848	0.021	0.014

表 2 工况 1 的膨胀机吸、排气参数表

$n/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	$t_o/^\circ\text{C}$	p_o/MPa	$t_i/^\circ\text{C}$	p_i/MPa	$\Delta H/\text{kW}$	$q_{mi}/\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	W_t/kW	η_{he}	$\eta_e\eta_g$
1 250	59.1	0.204	82.8	0.465	2.304	0.067 76	0.658	0.021	0.286
1 382	59.5	0.204	82.6	0.463	2.244	0.074 56	0.660	0.021	0.294
1 529	59.9	0.206	82.5	0.459	2.198	0.081 79	0.627	0.020	0.285
1 708	60.2	0.207	82.0	0.454	2.131	0.090 39	0.551	0.018	0.259
1 910	60.7	0.209	81.6	0.447	2.037	0.099 46	0.396	0.012	0.195

表 3 工况 2 的膨胀机吸、排气参数表

$n/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	$t_o/^\circ\text{C}$	p_o/MPa	$t_i/^\circ\text{C}$	p_i/MPa	$\Delta H/\text{kW}$	$q_{mi}/\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	W_t/kW	η_{he}	$\eta_e\eta_g$
1 206	61.5	0.207	82.8	0.458	1.880	0.064 29	0.621	0.021	0.330
1 330	61.5	0.207	82.7	0.457	1.876	0.070 75	0.622	0.021	0.331
1 472	61.7	0.209	82.6	0.453	1.859	0.077 57	0.593	0.020	0.319
1 624	62.0	0.212	82.1	0.449	1.812	0.084 95	0.511	0.017	0.282
1 848	62.3	0.213	81.8	0.444	1.767	0.095 48	0.379	0.012	0.215

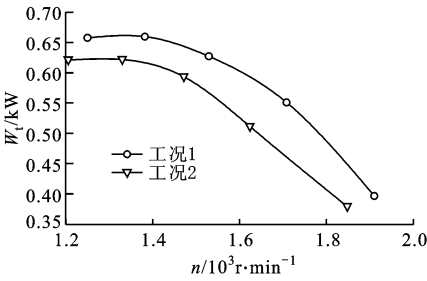


图 3 发电功率随转速的变化

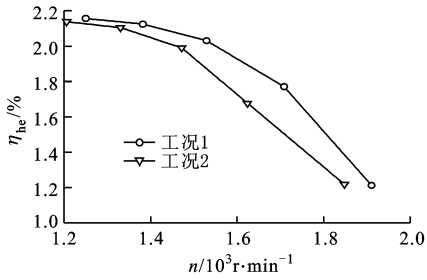


图 4 系统热电效率随转速的变化

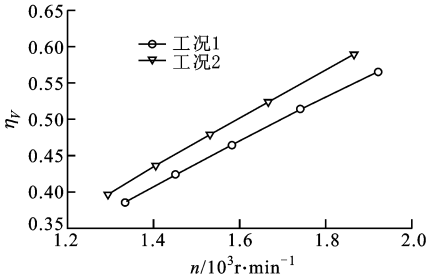


图 5 容积效率随转速的变化

4 结 论

本文依据有机朗肯循环原理,采用 R123 作为循环工质、涡旋膨胀机作为能量回收机械,建立了小型低温余热发电试验系统,并对膨胀机转速变化时的系统性能进行了测试。

试验结果表明:在热源温度和供热量不变的情况下,随着转速的增加,膨胀机吸气压力、吸气温度均逐渐降低,排气压力、排气温度均逐渐升高,吸气

参数变化较排气参数变化明显;系统的发电功率和系统热电效率均随着转速的增加而降低,在低转速时变化较小,在高转速时变化明显,两种工况下系统最大发电功率分别为 0.66 kW 和 0.62 kW,最大系统热电效率均为 2.1%;涡旋膨胀机的容积效率随着转速的增加而增加,工况 1 时容积效率从 38.5% 增加至 56.5%,工况 2 时容积效率从 39.7% 增加至 60.0%。

参考文献:

[1] MAIZZA V, MAIZZA A. Unconventional working fluids in organic Rankine-cycles for waste energy recovery systems [J]. Applied Thermal Engineering, 2001, 21(3): 381-390.

[2] SALEH B, KOGLBAUER G, WENDLAND M, et al. Working fluids for low-temperature organic Rankine cycles [J]. Energy, 2007, 32(7): 1210-1221.

[3] 魏东红, 陆震, 鲁雪生, 等. 废热源驱动的有机朗肯循环系统变工况性能分析[J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(8): 1398-1402.

WEI Donghong, LU Zhen, LU Xuesheng, et al. Performances analysis of the organic Rankine cycle driven by exhaust under disturbance conditions [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2006, 40(8): 1398-1402.

[4] WEI Donghong, LU Xuesheng, LU Zhen, et al. Performance analysis and optimization of organic Rankine cycle (ORC) for waste heat recovery [J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(4): 1113-1119.

[5] MANOLAKOS D, PAPADAKIS G, MOHAMED E S, et al. Design of an autonomous low-temperature solar Rankine cycle system for reverse osmosis desalination [J]. Desalination, 2005, 183(1/3): 73-80.

[6] 沈维道, 蒋智敏, 童钧耕. 工程热力学 [M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2001.

(编辑 王焕雪)